

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Gy, 68.55.Nq, 68.60.Dv, 81.15.Pq, 81.40.Ef, 81.65.Rv

Структура та властивості композиційних ніклевих покриттів, одержаних програмно-регульованим струмом

В. В. Титаренко, В. О. Заблудовський*

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
просп. Дмитра Яворницького, 19,
49005 Дніпро, Україна*
**Український державний університет науки і технологій,
вул. Академіка Лазаряна, 2,
49010 Дніпро, Україна*

Аналіза результатів дослідження катодних поляризаційних кривих і впливу режимів осадження на катодний вихід за струмом, тонку структуру, структуру росту у поперечному перерізі, мікротвердість і зносостійкість композиційних ніклевих покриттів уможливила встановити режими програмно-регульованого струму (густину ступенів електричного струму, що чергуються, а також їхню тривалість), за яких спостерігається формування мікрошаруватих структур композиційних ніклевих покриттів з підвищеним вмістом частинок нанодіаманту (2,6% мас.) і товщиною мікрошарів < 1 мкм. Показано, що чергування ступенів постійного струму густиною від гранично допустимої за якістю покриття, що осаджується, до граничної за дифузією уможливорює підвищити мікротвердість і зносостійкість покриттів, збільшити швидкість їхнього осадження. Досліджено кінетику зародкоутворення та росту композиційних ніклевих покриттів, одержаних програмно-регульованим струмом. Зі збіль-

Corresponding author: Valentyna Vasylivna Tytarenko
E-mail: tytarenko.valentina@gmail.com

*National Technical University 'Dnipro Polytechnic',
19 Dmytro Yavornytsky Ave., UA-49005 Dnipro, Ukraine*
**Ukrainian State University of Science and Technologies,
2 Academician Lazaryan Str., UA-49010 Dnipro, Ukraine*

Citation: V. V. Tytarenko and V. O. Zabudovs'kyi, Structure and Properties of Composite Nickel Coatings Obtained by Program-Controlled Current, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 47, No. 4: 415–425 (2025) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.47.04.0415](https://doi.org/10.15407/mfint.47.04.0415)

© Publisher PH 'Akadempriodyka' of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

шенням катодної перенапруги від 0,97 В до 1,26 В і зі збільшенням густини струму від 100 А/м² до 500 А/м² швидкість зародження кристалічних зародків збільшується у 1,3–1,7 разів, а швидкість росту — у 2,5–3,0 рази. Спостерігається формування композиційних ніклевих покриттів з більш дрібнокристалічною структурою, про що свідчить зменшення розмірів блоків мозаїки від 96 нм до 65 нм.

Ключові слова: композиційні ніклеві покриття, частинки ультрадисперсного діаманту, програмно-регульований струм, мікрошарувата структура росту, тонка структура, механічні властивості.

Analysis of the results of studying cathodic polarization curves and the influence of deposition regimes on the cathode-current efficiency, fine structure, cross-sectional growth structure, microhardness and wear resistance of composite nickel coatings makes it possible to establish program-controlled current modes (density of variable steps of electric current, as well as their duration), during which the formation of microlayered structures of composite nickel coatings with an increased content of nanodiamond particles (2.6% wt.) and a microlayer thickness of < 1 μm is observed. As shown, the variable DC steps with a density from the maximum allowable quality of the deposited coating to the maximum on diffusion allow both increasing the microhardness and wear resistance of coatings and increasing the rate of their deposition. The kinetics of nucleation and growth of composite nickel coatings obtained by program-controlled current are studied. With an increase in cathode overpotential from 0.97 V to 1.26 V and with an increase in current density from 100 A/m² to 500 A/m², the nucleation rate of crystalline nuclei increases by 1.3–1.7 times, and the growth rate increases by 2.5–3.0 times. Composite nickel coatings become more finely crystalline, as evidenced by a decrease in the size of mosaic blocks from 96 nm to 65 nm.

Key words: composite nickel coatings, ultradisperse diamond particles, program-controlled current, microlayered growth structure, fine structure, mechanical properties.

(Отримано 9 вересня 2024 р.; остаточн. варіант — 20 листопада 2024 р.)

1. ВСТУП

Розроблення найбільш економічних і технологічно простих методів осадження металевих покриттів із необхідним комплексом властивостей залишається актуальним завданням і нині. Традиційним є електроосадження за допомогою постійного струму [1–3]. Водночас властивості покриттів, що осаджуються, змінюють шляхом варіювання складу електроліту, температури, кислотности, введення комплексоутворювальних і блискоутворювальних добавок, що не завжди дає можливість одержувати покриття з потрібним комплексом властивостей.

Більше можливостей у керуванні процесами формування струк-

тури та властивостей покриттів з'являється під час використання програмних режимів електролізу [4–6]. Так, у роботі [7] нами був застосований програмно-регульований струм для осадження ніклевих покриттів. Зміною за програмою густини струму від гранично допустимої за якістю покриття, що осаджується (100 А/м^2), до граничної по дифузії (1000 А/м^2) вдалось одержати мікрошарувату структуру у покриттях чистого ніклю, формування якої викликане пасивувальною дією адсорбованого Гідрогену, вміст якого в ніклевому покритті становить близько 1 ат.%. Програмний струм уможливив одержати покриття зі зменшеною внутрішньою напругою, збільшити мікротвердість покриттів від 1850 МПа до 4300 МПа та швидкість осадження ніклевих покриттів у 1,5–1,6 рази.

Комплексним вирішенням проблеми поліпшення функціональних властивостей поверхні у даній роботі є модифікування металевої матриці частинками ультрадисперсного діаманту (УДД) з одержанням композиційних електролітичних покриттів (КЕП) на основі ніклю та застосування програмного режиму електролізу.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА

Електроосадження композиційних ніклевих покриттів проводили з сульфатного електроліту ніклювання наступного складу: $\text{Ni}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 300 г/л, H_3BO_3 — 30 г/л, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ — 50 г/л за рН 5 і температури у 293–298 К. Концентрація частинок УДД у водному розчині електроліту становила 2 г/л. Для осадження покриттів використовували програмно-регульований струм густиною, що періодично чергується від 100 А/м^2 до 500 А/м^2 і тривалістю першого та другого ступенів постійного струму у 300 с і 30 с відповідно. Для порівняння з водного розчину електроліту було одержано композиційні ніклеві покриття за допомогою постійного струму густиною у 100 А/м^2 і 500 А/м^2 .

Елементний склад поверхні покриттів досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа JSM-64901LV (Японія) з енергодисперсійним спектрометром INCA PENTAх3 (OXFORD Instruments). Структуру росту у поперечному перерізі плівок ніклю досліджували за допомогою оптичного мікроскопа «МИМ-8М». Торцеві шліфи для металографічних досліджень одержували механічним поліруванням. Для виявлення структури поперечного перерізу плівки ніклю хемічно щавились у 50%-розчині азотної кислоти упродовж 10–15 с. Вихід за струмом металу (ВСМ) визначали за результатами зіставлення ґравіметричних вимірювань маси осадженого металу з кількістю електрики, що пройшла через межу поділу фаз. Мікротвердість H_u покриттів міряли на мікротвердомірі ПМТ-3 за навантаження на індентор у 0,196 Н.

Для дослідження фазового складу та тонкої структури плівок нік-

лю використовували рентгенівське обладнання — дифрактометр ДРОН-2.0 із застосуванням скінтіляційної реєстрації Рентгенових променів. Знімання для визначення фазового складу ніклевих плівок здійснювалося у монохроматичному випроміненні CoK_α . Середню величину блоків мозаїки D та відносну мікродеформацію кристалічної ґратниці $\Delta a/a$ визначали методом апроксимації [8]. У якості еталона застосовували відпалений нікель. Густина дислокацій ρ оцінювали за істинним фізичним розширенням дифракційної лінії. Період кристалічної ґратниці a визначали за видимим максимумом дифракційної лінії з урахуванням її ширини та поправки на геометрію знімання.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Виходячи з результатів досліджень катодних поляризаційних кривих (рис. 1), для нанесення композиційних ніклевих покриттів товщиною у $\cong 25\text{--}30$ мкм було розроблено програму регульованого струму [9], схему якої наведено на рис. 2.

За період дії програми у 330 с густина постійного струму змінюється від 100 А/м^2 до 500 А/м^2 .

Вибір середньої густини струму по процесу та тривалості ступенів електричного струму, що чергуються, зумовлений якістю покриттів. Так, допустима за якістю покриття густина струму для ніклю-

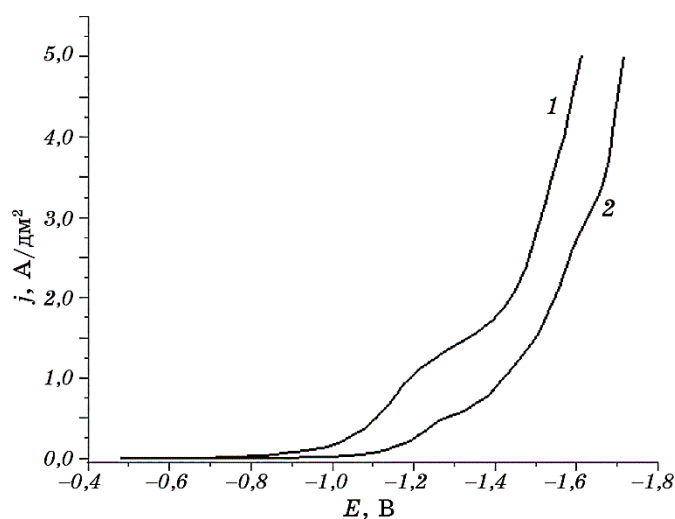


Рис. 1. Катодні поляризаційні залежності, одержані у сірчанокиислому електроліті ніклювання: 1 — без УДД, 2 — з УДД.

Fig. 1. Cathodic polarization dependences obtained in sulphuric nickel-plating electrolyte: 1—without UDD, 2—with UDD.

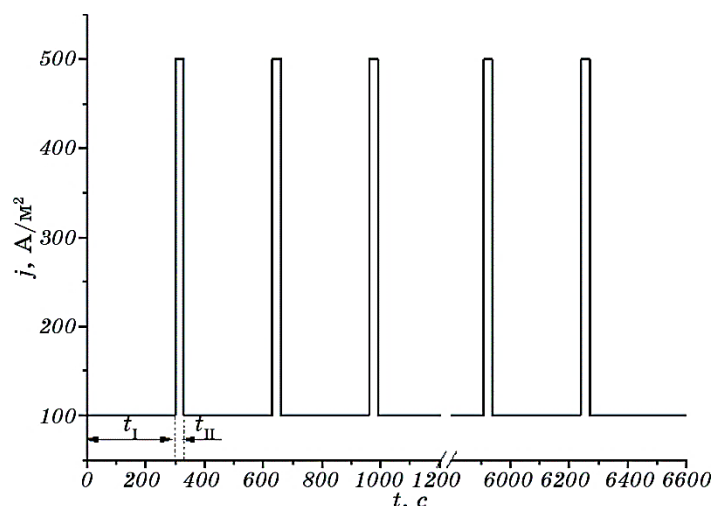


Рис. 2. Схема програмованого струму.

Fig. 2. Programmable current circuit.

вання у сірчанокиислому електроліті — $\cong 80\text{--}100 \text{ A/m}^2$. За цих густин струму для даного водного розчину електроліту не вступають в силу концентраційні обмеження, тобто не спостерігається «підгоряння» плівок [10].

На рисунку 3, *a* наведено дифрактограму порошка УДД, на якій присутні дифракційні максимуми діамантової фази вуглецю без домішок.

Рентгеноструктурні дослідження фазового складу композиційних ніклевих покриттів, одержаних за допомогою постійного струму густиною у 100 A/m^2 (рис. 3, *б*), показали утворення однофазних покриттів з ГЦК-ґратницями. З аналізу дифрактограм (рис. 3, *a, б*) видно, що дифракційні максимуми, що відповідають діамантовій фазі вуглецю, накладаються на лінії, що відповідають кристалічній фазі електролітичного ніклю, що ускладнює визначення співвідношення нанодіаманту та ніклю у композиційному покритті.

У композиційних ніклевих покриттів, одержаних як за допомогою постійного струму густиною у 500 A/m^2 (рис. 3, *в*), так і програмно-регульованим струмом (рис. 3, *г*), на великих кутах Рентгенової дифракції (у кобальтовому випроміненні) виявлено дифузний максимум $d^{(hkl)} = 0,126 \text{ нм}$. Дослідження показали, що він належить відбиванню від гранецентрованої ґратниці діаманту.

На дифрактограмах зразків спостерігається перерозподіл інтенсивності дифракційних максимумів, які відповідають відбиванню від площин (111) і (220), що свідчить про формування у покриттях композиційного електролітичного ніклю аксіальної текстури типу

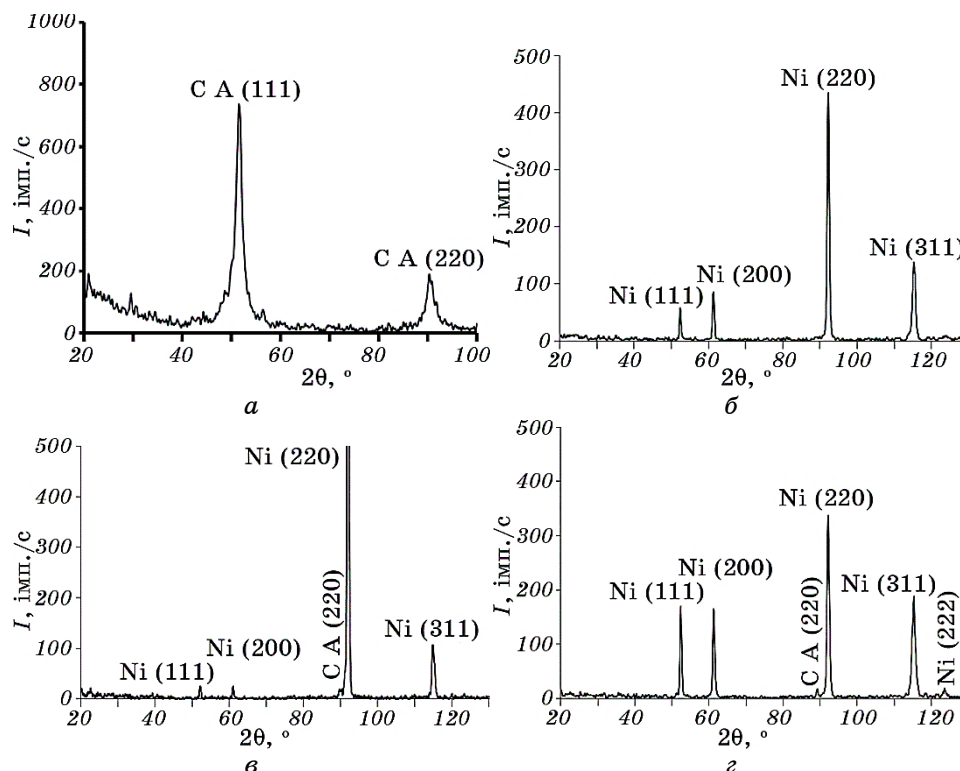


Рис. 3. Дифрактограми порошка УДД (а), а також плівок Ni + УДД, осаджених за допомогою як постійного струму: $j = 100 \text{ А/м}^2$ (б), $j = 500 \text{ А/м}^2$ (в), так і програмно-регульованого струму $j_I = 100 \text{ А/м}^2$, $j_{II} = 500 \text{ А/м}^2$ (г).

Fig. 3. X-ray diffraction curves of UDD powder (a), as well as Ni + UDA films, deposited using direct current $j = 100 \text{ A/m}^2$ (b), $j = 500 \text{ A/m}^2$ (c) or program-controlled current $j_I = 100 \text{ A/m}^2$, $j_{II} = 500 \text{ A/m}^2$ (d).

[110]. Формування аксіальної текстури з великими кристалографічними індексами пояснюється збільшенням катодної перенапруги від 0,74 В до 0,97 В для режимів осадження за допомогою постійного струму густиною у 100 А/м^2 за введення добавки частинок УДД у водний розчин електроліту концентрацією у 2 г/л (рис. 1). Для режиму осадження за допомогою постійного струму густиною у 500 А/м^2 значення катодної перенапруги становить 1,26 В.

Дослідження тонкої структури покриттів (табл. 1) показали, що за електроосадження композиційних ніклевих покриттів за допомогою постійного струму густиною у 500 А/м^2 та програмно-регульованого струму період кристалічної ґратниці ніклю має значення, менше еталонного ($a_0 = 0,3524 \text{ нм}$). Причиною зазначеного зменшення величини a є, насамперед, нерівноважна кристалізація,

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив режимів електроосадження на структуру композиційних ніклевих покриттів.**TABLE 1.** The influence of electrodeposition modes on the structure of composite nickel coatings.

Режим осадження	j , А/м ²	a , нм	D , нм	ρ , $\times 10^{10} \cdot \text{м}^{-2}$	$\Delta a/a$, $\times 10^{-3}$	ВСМ, %
Постійний струм	100	0,3526	96	6,7	+0,57	93
	500	0,3523	104	3,3	-0,28	77
Програмно-регульований струм	100, 500	0,3515	65	14,2	-2,55	63

що супроводжується утворенням нерівноважних дефектних структур. Із застосуванням програмно-регульованого струму величина мікрODEФОРМАЦІЙ і густина дислокацій збільшуються. Зменшення розмірів блоків мозаїки викликано збільшенням перенапруги кристалізації, що приводить до більш нерівноважного процесу кристалізації, а також зменшення виходу металу за струмом (табл. 1).

Судячи з величин параметра ґратниці, мікронапруження в композиційних ніклевих покриттях, одержаних за допомогою постійного струму густиною у 100 А/м², є напруженнями стиснення, а в покриттях, осаджених за допомогою постійного струму густиною у 500 А/м² та програмно-регульованим струмом, — напруженнями розтягування.

За зміною періоду кристалічної ґратниці ніклю оцінювалася концентрація вакансій у композиційних покриттях. Водночас враховувалося, що у гранецентрованих кубічних кристалах зменшення a на 0,2% спричинюється 1 ат.% вакансій [10]. Оскільки за електроосадження композиційних ніклевих покриттів за допомогою програмно-регульованого струму $a = 0,3515$ нм, визначено, що концентрація вакансій становить 1,0–1,2 ат.%. Можна припустити, що надлишок вакансій, що утворюється, сприяє об'єднанню їх у пари — дівакансії. Внаслідок цього зменшується їхня сумарна поверхня, а відповідний виграш у поверхневій енергії забезпечує стійкість спареної вакансії; енергія активації міграції спареної вакансії складає близько 0,7–0,8 еВ. Величина енергії активації для покриттів, одержаних за імпульсної електролізи, становить близько 0,7 еВ ($1,16 \cdot 10^{-19}$ Дж), тобто менше енергії утворення та міграції моновакансій у ніклі, що дорівнює 1,4–1,5 еВ [10].

За електроосадження композиційних ніклевих покриттів за допомогою програмно-регульованого струму діють два чинники — це нерівноважна кристалізація та Гідроґен, що виділяється у великій кількості на катоді та може знаходитись у вакансіях. Не виключене утворення комплексів атом Гідроґену–вакансія, які також рухливі, та енергія їхньої активації міграції менше, ніж моновакансій [10].

Із збільшенням густини струму від 100 А/м^2 до 500 А/м^2 спостерігається зсув катодного потенціалу в електронегативну область (рис. 1). Зміна катодного потенціалу приводить до перерозподілу парціальних складових струмів відновлення ніклю та Гідрогену. Водночас газовиділення на катоді також збільшується, а вихід металу за струмом зменшується (табл. 1). Оцінка концентрації Гідрогену, що виділяється на катоді, по виходу ніклю за струмом свідчить про те, що у процесі осадження на постійному струмі густиною у 500 А/м^2 вихід за струмом Гідрогену в 3 рази перевищує кількість Гідрогену, що виділяється за густини струму у 100 А/м^2 .

Дослідження торцевих шліфів композиційних ніклевих покриттів (рис. 4, в) показали, що покриття мають чітко виражену шарувату структуру росту у поперечному перерізі, що спричинено паси-

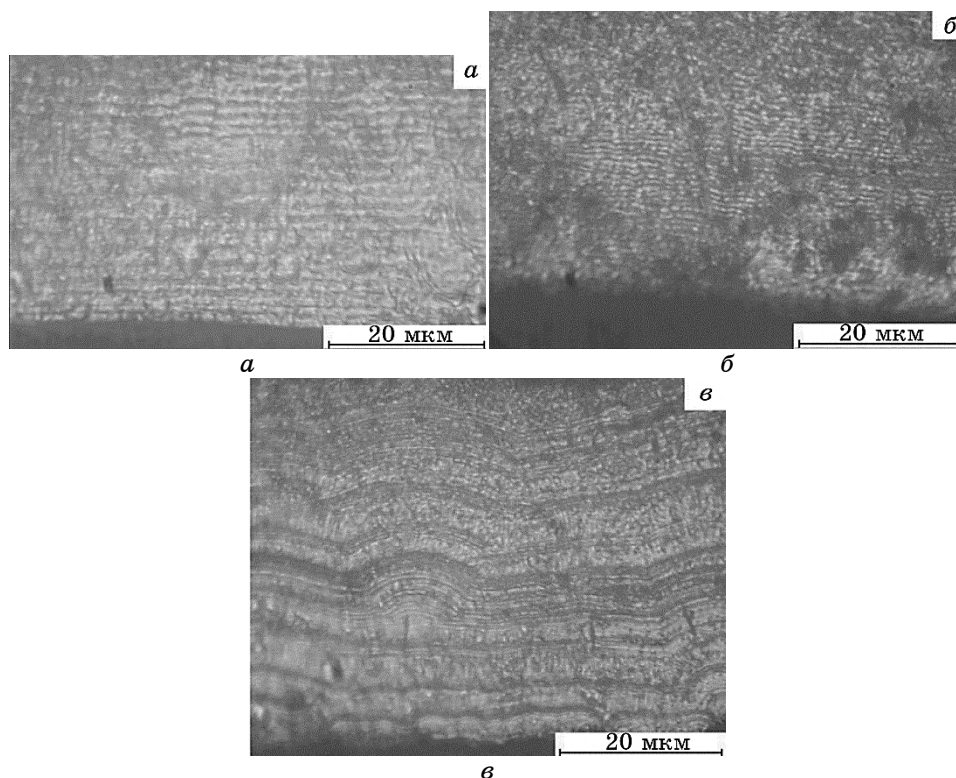


Рис. 4. Структура композиційного нікелевого покриття у поперечному перерізі: постійний струм $j = 100 \text{ А/м}^2$ (а), постійний струм $j = 500 \text{ А/м}^2$ (б), програмно-регульований струм (в).

Fig. 4. The structure of the composite nickel coating in the cross section: direct current $j = 100 \text{ А/м}^2$ (а), direct current $j = 500 \text{ А/м}^2$ (б), program-controlled current (в).

ТАБЛИЦЯ 2. Вплив режимів електроосадження на механічні властивості композиційних ніклевих покриттів і вміст співосадженого нанодіаманту у металевій матриці.

TABLE 2. The effect of electrodeposition modes on the mechanical properties of composite nickel coatings and the content of co-deposited nanodiamond in the metal matrix.

Режим осадження	j , А/м ²	$C_{\text{УДД}} \pm 0,01$, % мас.	H_{μ} , МПа	Середній знос, мг/год.
Постійний струм	100	1,43	3295 ± 40	1,8
	500	1,75	2800 ± 30	0,6
Програмно-регульований струм	100, 500	2,60	4187 ± 30	0,5

вувальним впливом адсорбованого Гідрогену та частинок УДД, співосаджених на поверхню покриття, що формується.

За період дії програми за змінної густини постійного струму від гранично допустимої за якістю осаджуваного покриття у 100 А/м² до граничної за дифузією у 500 А/м² формується мікрошарувата структура (рис. 4, з), що складається з мікрошарів композиційного нікелевого покриття товщиною у 0,7–0,8 мкм і 0,4–0,5 мкм відповідно.

Структурні зміни позначаються на механічних властивостях покриттів, що осаджуються (табл. 2).

Збільшення концентрації частинок дисперсної фази у покриттях, осаджених за допомогою програмно-регульованого струму, зумовлено високими миттєвими густинами струму за час дії другого ступеня постійного струму, а отже, й розрядом йонів Ніклю за більш високих значень катодної перенапруги, що визначає збільшення мікротвердості та зносостійкості ніклевих композиційних покриттів.

Зменшення тривалості ступеня постійного струму густиною у 500 А/м² сприяє наближенню дифузійного фронту до поверхні катоди та пришвидшенню процесу вирівнювання концентрації йонів, які розряджаються, що зумовлює більш рівномірний розподіл частинок УДД у покритті.

Із збільшенням концентрації дисперсних частинок у покритті розмір кристалітів ніклю зменшується (табл. 1) внаслідок адсорбції частинок УДД на кристалітах, які ростуть, що приводить до гальмування їхнього подальшого зростання. Такий процес сприяє збільшенню швидкості утворення кристалічних зародків (табл. 3).

Теоретичні й експериментальні дослідження кінетики зародження та росту поверхневих зародків [11] показали (табл. 3), що початкові стадії формування структури та механізм росту плівок [6]

ТАБЛИЦЯ 3. Залежність швидкості зародкоутворення та росту композиційних ніклевих покриттів від режимів електроосадження.**TABLE 3.** Dependence of the rate of nucleation and growth of composite nickel coatings on electrodeposition modes.

Режим осадження	j , А/м ²	$\eta_{\text{кр.}}$, мВ	$J_{\text{теор.}}$, м ⁻² ·с ⁻¹	$J_{\text{експ.}}$, м ⁻² ·с ⁻¹	$\nu_{\text{теор.}}$, м/с	$\nu_{\text{експ.}}$, м/с
Постійний струм	100	74	$3,2 \cdot 10^{12}$	$6,5 \cdot 10^{12}$	$0,2 \cdot 10^{-8}$	$0,3 \cdot 10^{-8}$
	500	97	$4,3 \cdot 10^{12}$	$7,4 \cdot 10^{12}$	$0,5 \cdot 10^{-8}$	$0,8 \cdot 10^{-8}$
Програмно-регульований струм	100, 500	126	$5,6 \cdot 10^{12}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$0,3 \cdot 10^{-8}$	$0,5 \cdot 10^{-8}$

визначаються режимом електроосадження. Так, зі збільшенням катодної перенапруги від 0,97 до 1,26 В, зі збільшенням густини струму від 100 до 500 А/м², швидкість зародження кристалічних зародків J збільшується у 1,3–1,7 разів, а швидкість росту ν — у 2,5–3,0 рази (табл. 3). Покриття стають більш дрібнокристалічними, про що свідчить зменшення розмірів блоків мозаїки (табл. 1).

Таким чином, варіюванням величини густини струму та його тривалості за період дії програми можна керувати кінетикою зародження та росту кристалітів, а, отже, структурою та властивостями покриття загалом. Формування за допомогою програмно-регульованого струму мікрошаруватої структури композиційних ніклевих покриттів з підвищеним вмістом частинок нанодіаманту та товщиною мікрошарів < 1 мкм уможливорює підвищити мікротвердість і зносостійкість покриттів, збільшити швидкість їхнього осадження у 1,5 рази.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. H. Kazimierzczak, K. Szymkiewicz, E. Gileadi, and N. Eliaz, *Coatings*, **9**, No. 2: 93 (2019).
2. R. Hessam, P. Najafisayar, and S. Rasouli, *Mater. Renew. Sustain. Energy*, **11**: 259 (2022).
3. S. I. Ghazanlou, A. H. S. Farhood, S. Ahmadiyeh, E. Ziyaei, A. Rasooli, and S. Hosseinpour, *Metall. Mater. Trans. A*, **50**: 1922 (2019).
4. Е. П. Штапенко, Е. О. Воронков, В. О. Заблудовський, В. В. Титаренко, В. С. Краєва, В. М. Кузнецов, *J. Chem. Technol.*, **31**, № 3: 516 (2023).
5. В. В. Титаренко, В. О. Заблудовський, *Журнал фізичних досліджень*, **27**, № 4: 4602 (2023).
6. Е. П. Штапенко, В. В. Титаренко, В. О. Заблудовський, Е. О. Воронков, *Квантово-механічні дослідження процесів електрокристалізації металів та композиційних матеріалів* (Дніпро: Середняк Т.К.: 2024).

7. В. В. Титаренко, В. А. Заблудовский, Э. Ф. Штапенко, И. В. Титаренко, С. А. Гришечкин, *Металлофиз. новітні технол.*, **42**, № 3: 333 (2020).
8. С. І. Мудрий, Ю. О. Кулик, А. С. Якимович, *Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві* (Львів: ЛНУ імені Івана Франка: 2017).
9. В. О. Заблудовський, В. В. Титаренко, Е. П. Штапенко, *Спосіб отримання мікрошаруватих композиційних електролітичних нікелевих покриттів*, Патент України на винахід № 125885 (Опубліковано 22 червня 2022).
10. В. А. Заблудовский, Э. Ф. Штапенко, В. В. Титаренко, *Программный импульсный электролиз металлов и композиционных материалов* (Saarbrücken: Lambert Academic Publishing: 2019).
11. В. А. Заблудовский, В. В. Дудкина, *Металлофиз. новейшие технол.*, **32**, № 6: 757 (2010).

REFERENCES

1. H. Kazimierzczak, K. Szymkiewicz, E. Gileadi, and N. Eliaz, *Coatings*, **9**, No. 2: 93 (2019).
2. R. Hessam, P. Najafisayar, and S. Rasouli, *Mater. Renew. Sustain. Energy*, **11**: 259 (2022).
3. S. I. Ghazanlou, A. H. S. Farhood, S. Ahmadiyeh, E. Ziyaei, A. Rasooli, and S. Hosseinpour, *Metall. Mater. Trans. A*, **50**: 1922 (2019).
4. E. P. Shtapenko, E. O. Voronkov, V. O. Zabudovs'kyi, V. V. Tytarenko, V. S. Krayeva, and V. M. Kuznetsov, *J. Chem. Technol.*, **31**, No. 3: 516 (2023) (in Ukrainian).
5. V. V. Tytarenko and V. O. Zabudovs'kyi, *Zhurnal Fizychnykh Doslidzhen*, **27**, No. 4: 4602 (2023) (in Ukrainian).
6. E. P. Shtapenko, V. V. Tytarenko, V. O. Zabudovs'kyi, and Ye. O. Voronkov, *Kvantovo-Mekhanichni Doslidzhennya Protsesiv Ehlektrokrystalizatsiyi Metaliv ta Kompozytsiynykh Materialiv* [Quantum Mechanical Studies of Electrocrystallization Processes of Metals and Composite Materials] (Dnipro: Serednyak T.K.: 2024) (in Ukrainian).
7. V. V. Tytarenko, V. A. Zabudovskiy, E. Ph. Shtapenko, I. V. Tytarenko, and S. A. Grishchkin, *Metallfiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 3: 333 (2020) (in Russian).
8. S. I. Mudryy, Yu. O. Kulyk, and A. S. Yakymovych, *Rentgenostrukturnyy Analiz u Materialoznavstvi* [X-Ray Structural Analysis in Materials Science] (Lviv: LNU imeni Ivana Franka: 2017) (in Ukrainian).
9. V. O. Zabudovs'kyi, V. V. Tytarenko, and E. P. Shtapenko, *Sposib Otrymannya Mikrosharuvatykh Kompozytsiynykh Ehlektrolitychnykh Nikelevykh Pokryttiv* [Method for Producing Microlayered Composite Electrolytic Nickel Coatings], Patent of Ukraine No. 125885 (Published June 22, 2022) (in Ukrainian).
10. V. A. Zabudovskiy, E. F. Shtapenko, and V. V. Titarenko, *Programmnyy Impul'snyy Ehlektroliz Metallov i Kompozitsionnykh Materialov* [Software Pulse Electrolysis of Metals and Composite Materials] (Lambert Academic Publishing, Saarbrücken: 2019) (in Russian).
11. V. A. Zabudovskiy and V. V. Dudkina, *Metallfiz. Noveishie Tekhnol.*, **32**, No. 6: 757 (2010) (in Russian).